

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Сумський державний університет**

**Класичний фаховий коледж**

(повна назва інституту/факультету)

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

20\_\_ р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(бакалавр / магістр)

зі спеціальності 171Електроніка

(код та назва)

освітньо-професійної програми Електронні інформаційні системи

(освітньо-професійної / освітньо-наукової)

(назва програми)

на тему: Числове моделювання гетероструктур на основі полікристалічного кремнію

Здобувача групи ЕІз-91к

(шифр групи)

Чиркової Ірини Андріївної

(прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

(підпис)

Ірина ЧИРКОВА

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник Викладач к.ф.-м.н., Максим ІВАЩЕНКО

(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Консультант<sup>1)</sup>

(посада, науковий ступінь, вчене звання Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

**Конотоп – 2023**

## АНОТАЦІЯ

Об'єктом дослідження дипломної роботи є процеси числового моделювання експлуатаційних характеристик фотоперетворювачів, виконаних на базі напівпровідникових плівок полікристалічного сіліцію (p-Si).

Мета роботи полягає у дослідженні оптичних та електрофізичних характеристик сонячної батареї завдяки побудові ефективної моделі робочих характеристик фотоперетворювачів, виконаних на базі напівпровідникових плівок полікристалічного сіліцію.

При виконанні роботи використовувалася пакет SCAPS-1D для моделювання тонкопліткових фотоперетворювальних батарей з гетеропереходами p-Si / Si.

У результаті проведених досліджень було встановлено, що максимальна ефективність ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ на основі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ n-p-Si/p-Si з оптимальною конструкцією (товщина поглинального шару  $d_{Si} = 0,5$  мкм, товщина віконного шару  $d_{p-Si} = 0,1$  мкм,  $T = 340$  К) може досягати значень  $\eta=13,71$  %.

Робота викладена на 35 сторінках, у тому числі включає 8 рисунків, 6 таблиць, список цитованої літератури із 34 джерел.

## ЗМІСТ

	с.
<b>ВСТУП</b> .....	5
<b>РОЗДІЛ 1</b>	
<b>СТРУКТУРНІ, ОПТИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВОК p-Si ТА ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ p-Si/Si (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)</b> .....	
1.1 Фізичні властивості плівок полікристалічного сіліцію.....	7
1.2 Наноструктури, на основі полікристалічного сіліцію .....	11
Використання полікристалічного сіліцію в фотоперетворювальних	
1.3 модулях .....	12
1.4 Механізми зарядопереноса через гетероперехід .....	15
<b>РОЗДІЛ 2</b>	
<b>ВИБІР ПРОГРАМНОГО МЕТОДУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ЦЬОГО ВИБОРУ. ОТРИМАННЯ БАЗОВИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ</b> .....	
2.1 Розрахунок характеристик фотоперетворювальних фотоелементів .....	18
2.2 Моделювання характеристик ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ на основі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ: основні підходи та принципи.....	19
2.3 Вибір базових вхідних параметрів моделювання .....	23
<b>РОЗДІЛ 3</b>	
	25

<b>РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧА</b>	
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>25</b>
3.1. Моделюва	25
фотоперетворювальних елементів на основі n-P-Si /p-Si.....	
3.1.1. Вплив експлуатаційної температури на електричні	
характеристики плівкової системи.....	25
3.1.2. Вплив товщини поглинаючого шару p-Si на електричні	
характеристики	26
<b>ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ.....</b>	
.....	
3.1.3. Вплив товщини віконного шару p-Si на електрофізичні	
властивості	28
<b>ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ.....</b>	
.....	32
.....	
3.2 Висновки.....	
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>33</b>

## ВСТУП

В наш час дослідники виявляють велику зацікавленість до використання тонких плівок полікристалічного сіліцію [1-4]. Причина цього інтересу криється в унікальному поєднанні електрофізичних і оптичних характеристик полікристалічного сіліцію (p-Si) [2]. Конденсати полікристалічного сіліцію характеризуються високою хімічною інертністю, стійкістю до кліматичних факторів, тому широко використовуються завдяки прозорості у видимій та інфрачервоній діапазонах спектру, для провідних поверхонь електрофізичних з'єднань, буферних шарів тонкопліткових фотоперетворювальних елементів і пристроїв відображення інформації [5]. Легування плівок полікристалічного сіліцію дозволяє досягти питомого опору  $2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Конденсати полікристалічного сіліцію мають хороші п'єзоелектричні та електролюмінесцентні властивості, завдяки чому знаходять застосування в газових фотоперетворювачах, пристроях генерації поверхневих акустичних хвиль, фотодіодах, фотонних криконстантах [2]. Конденсати полікристалічного сіліцію використовуються як віконні, відзеркалюючі, захисні та струмознімальні шари дешевих фотоперетворювачів великої площі [2].

При створенні фотоперетворювальних елементів особлива увага приділяється гетеропереходам n-p-Si / p-Si [2]. Це пов'язано з широкою областю фотосенсибільності цих структур, їх низькою вартістю і доступністю матеріалів гетеропари. Проте ККД елементів не перевищує 8% [21]. Збільшення продуктивності фотоперетворювальних елементів може бути досягнуто за

рахунок оптимізації характеристик окремих шарів і конструкції фотоперетворювачів. А це відбувається шляхом моделювання параметрів фотоперетворювальних елементів з використанням програмного забезпечення. Для числового моделювання робочих характеристик фотоперетворювачів, виконаних на базі напівпровідникових плівок полікристалічного сіліцію, застосовується декілька програм (AMPS-1D, SCAPS-1D, PS-1D, ASA, AFORS-NET), але найбільш зручною для використання вважається пакет SCAPS-1D [17,34]. Цей пакет використовується для знаходження основних характеристик фотоперетворювачів фотоперетворювальних елементів, фактора заповнення вольт-амперної характеристики, струму короткого замикання, напруги холостого ходу при обрахуванні індивідуальних характеристик напівпровідникових шарів, що входять до складу фотоелементів і меж розділу гетеропереходів [2].

Мета дипломної роботи - числове моделювання робочих характеристик фотоперетворювачів, виконаних на базі напівпровідникових плівок полікристалічного сіліцію. Отриманий розрахунок дозволяє вирішувати проблеми оптимізації структурних, електрофізичних та оптичних характеристик фотоперетворювальних елементів.

## РОЗДІЛ 1

### СТРУКТУРНІ, ОПТИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВОК p-Si ТА ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ p-Si/Si

#### (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)

#### 1.1. Фізичні властивості плівок полікристалічного сіліцію

Силіцій має найбільше поширення фотоперетворювачах серед прозорих провідних оксидів. Він виявляє стабільність при високих температурах, має високу хімічну стійкість, витривалий до опромінення, нетоксичний і легко піддається хімічному травленню [2]. Дуже важлива його перевага - відносна дешевизна. Однією з причин великого комерційного потенціалу p-Si є можливість його використання на великих площах з рівномірним розподілом оптичних і електрофізичних характеристик. Такі характеристики полікристалічного сіліцію як провідність, концентрація носіїв та їх рухливість знаходять широке застосування в електроніці. p-Si - це кристаличний непрямозонний напівпровідник n-типу. При 300 К ширина його забороненої зони становить  $\sim 1,1$  eV [2]. За допомогою легування можна змінювати провідність і прозорість p-Si. Для збільшення провідності використовують матеріали III групи (B, Al, Ga, In). Завдяки унікальним оптичним, електричним і п'єзоелектричним властивостям p-Si може застосовуватися в газових фотоперетворювачах, пристроях генерації поверхневих акустичних хвиль, фотодіодах, фотонних крикостантах, як детекторний матеріал для реєстрації УФ-випромінювання (320 ... 400 нм) [2, 6-9]. На основі p-Si можна

створювати економні світлодіоди. Текстуровані конденсати р-Si можна використовувати як високоефективні електронні автоемітери [2].

Завдяки своїм електрофізичним властивостям Силіцій знаходить широке застосування при створенні оптико-електронних пристроїв - фотоперетворювальних батарей та рідкокристалічних дисплеїв, фотодіодів та ін. електронних пристроїв, що пояснюється високою провідністю і прозорістю у видимій області спектра. Залежно від наявності різних домішок колір р-Si змінюється від білого до жовто-зеленого. Густина з'єднання становить  $(5,6 \cdot 10^{-6} \pm 0,001)$  кг/м<sup>3</sup> [2,5]. Силіцій досить летючий,  $T_{zag} = 2073$  К, при цьому летючість р-Si починає спостерігатися при температурі близько 1173К. При нагріванні Силіцій може змінювати колір. При кімнатній температурі він має білий колір, а при нагріванні — стає жовтим. Пояснюється це явище зменшенням ширини забороненої зони і переміщенням краю в спектрі поглинання з УФ-області в синю область видимого спектру [2, 18, 29].

Силіцій відносять до класу напівпровідників групи IV [10,12,32], який кристалізується в решітці типу вюрцита. Параметри решітки напівпровідника залежать від:

- 1) концентрації вільних електронів, яка діє через потенціал деформації мінімуму зони провідності;
- 2) концентрації атомів домішок і дефектів та різниці їх іонних радіусів щодо заміщеного іона матриці;
- 3) зовнішніх деформацій;
- 4) температури [2].

Недосконалості або дефекти порушують періодичність решітки. Ці недосконалості сильно впливають на механічні, теплові, електричні і оптичні властивості напівпровідників. Вони визначають пластичність, твердість, тепло- і електропровідність матеріалу [2, 12].



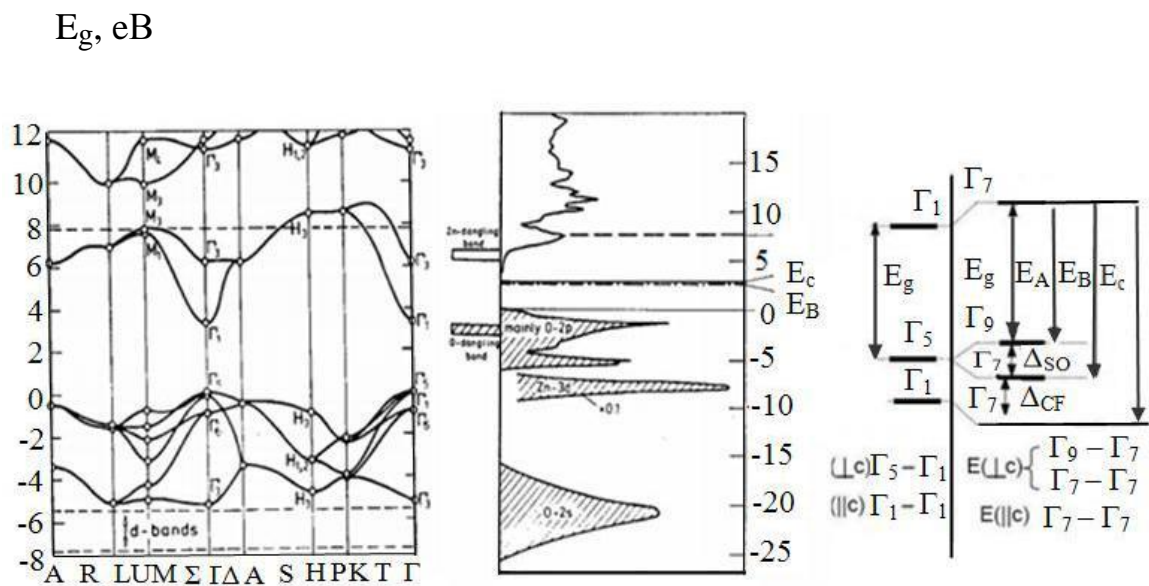


Рис. 1.1. Зонна структура (а), густина станів (б) і розщеплення валентної зони (в) завдяки спін-орбітальній взаємодії в p-Si. Нуль на графіках відповідає верхній межі зони валентності [2]

Напівпровідник p-Si використовується для виготовлення пристроїв електроніки, тому аналіз його зонної структури важливий для вивчення електрофізичних характеристик [2].

На рис. 1.1 зображена зонна структура полікристалічного сіліцію уздовж ліній високої симетрії зони Бріллюена. Для теоретичного отримання зонної структури застосували емпіричний гамільтоніан сильних зв'язків. В зонній структурі  $E(k)$  для P-Si між зайнятими і вільними зонами ( $\Gamma_1$  і  $\Gamma_{1,5}$ ) знаходиться оптична заборонена зона  $E_g \approx 3,3$  eV [2].

Заборонена зона розраховується як різниця між енергією зайнятих зон і енергією порожніх електронних зон. Вільні зони, які знаходяться вище забороненої зони, називаються зоною провідності. Найнижча точка зони провідності називається межею зони провідності. Межа зони провідності для полікристалічного сіліцію визначається при  $k = 0$ , в точці  $\Gamma$ . Точка  $\Gamma$  є  $k$ - межею валентної зони. Силіцій  $p$ -Si має однакові значення  $k$  в зоні валентності і на границі зони провідності, тому цей матеріал є прямозонним напівпровідником. Зонна структура матеріалу має шість зон валентності між  $-6$  та  $0$  eV (рис. 1.2). Ці шість зон відповідають  $2p$ -орбіталям кисню. Для зони провідності існує два видимих стани вище  $3$  eV, які відповідають незайнятим рівнями:  $3s$ [2, 11].

Фотоперетворювачахред бінарних напівпровідників Силіцій має найвищу енергію зв'язку екситонів  $\sim 60$  меВ. У спектрах люмінесценції  $p$ -Si при оптичному і катодному збудженні з'являються дві смуги випромінювання - вузька смуга в УФ-області ( $\lambda \sim 380$  нм,  $\Delta\lambda \sim 15$  нм) і широка смуга у видимій області ( $\lambda \sim 500$  нм,  $\Delta\lambda \sim 100$  нм). Наявність в забороненій зоні донорних або акцепторних рівнів визначає смугу випромінювання у видимій області. Донорні і акцепторні рівні обумовлені дефектами або домішками (роль дефектів грають кисневі вакансії, міжвузлові атоми цинку та інші локальні дефекти решітки) [2, 20].

У природі Силіцій зустрічається у вигляді мінералу цинкіту. Хімічно Силіцій амфотерний— реагує з кислотами з утворенням відповідних солей цинку, при взаємодії з розчинами лугів утворює комплексні гідроксоцінкати. При сплаві  $ZnO$  з основами і з більшістю оксидів металів утворюються цинкати [2, 12,20 ,22].

## 1.2. Наноструктури, на основі полікристалічного сіліцію

У 21-му столітті нано-технології вважають провідними технологіями. Завдяки нано-технологіям можна отримувати структури на молекулярному рівні. Сучасні дослідники виявляють великий інтерес до синтезу наночастинок. Унікальні оптичні та електронні властивості наночастинок дозволяють їх

використання в різних пристроях (в гнучких дисплеях, лазерах і терапевтичних приладах). Нині велике застосування знаходять такі наноструктури, як квантові точки, квантові ями, нанопроводи, наностержні і ін [2]. Знайдений зв'язок між шириною забороненої зони і розміром частинок доводить, що заборонена зона зі збільшенням розмірів частинок зменшується [2].

Фотоперетворювачахред відомих наноматеріалів Силіцій має три основні переваги:

- володіє унікальними напів-провідниковими і п'єзо-електричними характеристиками, тому він може бути застосовуватися в якості бази для електро-механічно пов'язаних давачів і конверторів;

- є біологічно-безпечний, має низьку токсичну дію, тому може застосовуватися в біо-медицині;

- застосовується в різноманітних конфігураціях нано-структур (нано-проводи, нано-струни, нано-кільця, нано-дуги і нано-спіралі) [2].

Нано-структури полі-кристалічного сіліцію мають унікальну властивість генерувати ультрафіолетове випромінювання при кімнатній температурі. Синтез одновимірних (1D) наноструктур p-Si знаходить широке застосування в фотонних приладах, ультрафіолетових лазерах, датчиках і т.п [33]. Вимушене випромінювання з'являлося під час використання полікристалічного сіліцію в структурах з квантовими ямами. У квантових ямах явище екситонної вимушеної емісії більш ефективно за рахунок збільшення енергії зв'язку екситонів. Якщо ж розглядати інші матеріали групи, то вимушене випромінювання у них спостерігалось тільки при низьких температурах і рідше - при кімнатній температурі. У структурах квантових ям, які базуються на p-Si, екситони мають велику енергію зв'язку в порівнянні з напівпровідниками з'єднань III-V[13]. Така властивість екситонів знаходить широке застосування при лазерній генерації та нелінійній абсорбції III-V-оксидних квантових вийомок [2].

Отримати одномірні нано-структури полі-кристалічного сіліцію можна за допомогою наступних методів: хімічне паро-фазне осадження, хімічна паро-фазна конденсація, термо-вакуумне випаровування, гідро-термічний метод, хімічне осадження метало-органічних сполук з парової фази [2].

Метод магнетронного розпилення дає можливість створювати нано-проводи з полі-кристалічного сіліцію з оптимальними електронними та оптичними властивостями. Метод імпульсної лазерної абляції з рідкої фази також широко використовується для синтезу нано-частинок. Полі-кристалічні і монокристалічні конденсати залежать від виду підкладок, на які наноситься матеріал різними методами. Епітаксціальні шари p-Si отримують на монокристалічних підкладках із слюди, сапфіру, германію, сіліцію, з'єднань III-V та ін[2, 26,27].

### **1.3. Використання полікристалічного сіліцію в фотоперетворювальних модулях**

Завдяки електричним і оптичним властивостям, дешевизні і доступності

Силіцій знаходить широке застосування в тонкоплівкових фотоперетворювальних елементах. Шари p-Si в тонкоплівковій технології наносяться для поліпшення струмознімання і для забезпечення максимального оптичного захоплення. Фотон сонячного випромінювання змінює свою траєкторію за рахунок різниці показників заломлення і розвиненого рельєфу поверхні. Таким чином при проходженні через шар P-Si відбувається розсіювання сонячного випромінювання (рисунок 1.3) [2].

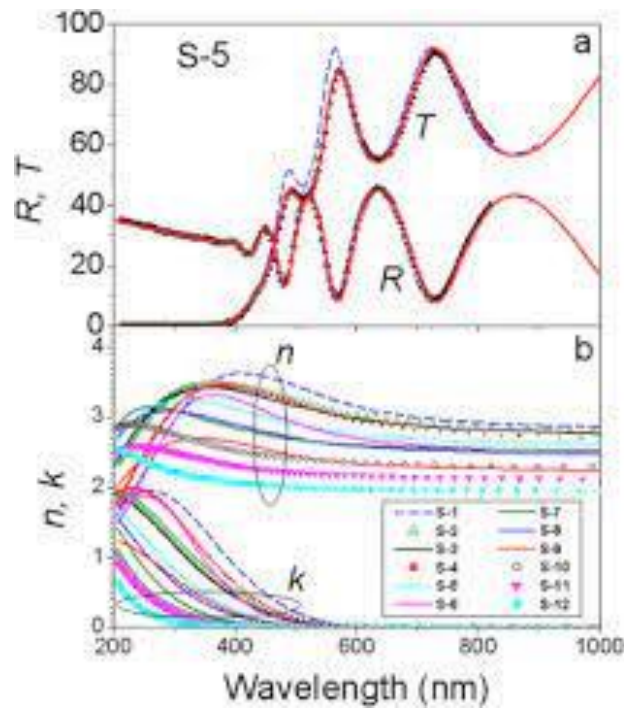


Рисунок 1.3 - Світлові можливості розсіювання p-Si[2]

У конструкціях фотоперетворювальних елементів дані матеріали застосовуються на основі моно- і полікристалічного сіліцію. У таблиці 1.1 наведені вимоги для прозорих провідних оксидів (ППО), які використовуються в якості тильних і лицьових контактів і відбиваючих шарів в сіліцієвих фотоперетворювальних елементах p-i-n- і n-i-p-конфігурацій [15].

Таблиця 1.1 - Вимоги до ППО, використовуваних в сіліцієвих фотоперетворювальних елементах [2, 16]

Конфігурація сонячного елемента	Лицьовий ППО	Тильний ППО
<i>p-i-n</i> -типу	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Низький поверхневий опір (&lt; 16 Ом).</li> <li>• Высоке оптичне пропускання (&gt; 80 %) в діапазоні 350...1100 нм.</li> <li>• Велика поверхневая шорсткість</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Низький поверхневий опір (&lt; 16 Ом).</li> <li>• Высоке оптичне пропускання (&gt; 80 %) в діапазоні 650...1100 нм для однопереходного ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ и в діапа-</li> </ul>

	(70...100 нм)	зоні 650...1100 нм для тандемного мікроморфного ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ
<i>n-i-p</i> -типу	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Низький поверхневий опір (&lt; 16 Ом).</li> <li>• Высоке оптичне пропускання (&gt; 80 %) в діапазоні 350...1100 нм.</li> <li>• Поверхнева наношорсткість не обмежена (частково задається полікристалічним шаром кремнію)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Низький поверхневий опір (&lt; 16 Ом).</li> <li>• Высоке оптичне пропускання (&gt; 80 %) в діапазоні 650...1100 нм для однопереходного ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ и в діапазоні 650...1100 нм для тандемного мікроморфного ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ</li> <li>• Поверхнева шорсткість не обмежена (задається текстурою тильного відбивача або підложки)</li> </ul>

#### 1.4. Механізми зарядопереносу через гетероперехід

Гетероперехідні фотоперетворювальні елементи на основі монокристалічних сіліцієвих підкладок та прозорого струмопровідного оксидного (ПСО) шару виявляють зацікавленість багатьох дослідників, тому що можуть забезпечити широку область спектральної чутливості: від ультрафіолетового спектра до інфрачервоного та забезпечити великі значення ККД перетворення сонячної енергії. Такі гетероструктури характеризуються низькою собівартістю, відносною простотою і низькою температурою технологічного процесу. Однією із перспективних, економічно ефективних та гнучких технологій є створення тонкоплівкових випрямляючих структур, фотодіодів, ультрафіолетових випромінювачів і фотоперетворювальних елементів на основі гетеропереходів *n-p-Si/p-Si* [2].

В наш час механізм перенефотоперетворювачання струму через ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ можна описати за допомогою фізичних моделей: дифузійна, емісійна, рекомбінаційна, емісійно-рекомбінаційна, тунельна і тунельно-рекомбінаційна. Всі струми, що протікають через такі переходи поділяють на теплові та нетеплові[2].

ВАХ ідеального р-п - переходу або ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ визначається дифузійною моделлю або моделлю Андерсона. У цій моделі не враховується наявність локалізованих зарядів на межі поділу напівпровідників. Дифузійна, емісійна і емісійно-рекомбінаційна моделі мають однаковий вираз, який визначає ВАХ ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ і має вигляд[2].

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\pm \frac{eU}{AkT}\right) - 1 \right], \quad (1.1)$$

$$I = I_{00} \exp\left(- \frac{eU_{k0}}{AkT}\right), \quad (1.2)$$

де  $I_0$  - струм насичення ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ;

$U$  - зовнішня напруга, прикладена до р-п - переходу;

$A$  - діодний коефіцієнт або коефіцієнт ідеальності переходу;

$I_{00}$  - константа, яка не залежить від температури;

$U_{k0}$  - висота потенційного бар'єру на переході при відсутності зовнішньої напруги.

Пояснити проходження струму через деякі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ можна за допомогою моделі, яка враховує наявність на міжфазній межі тонкого шару речовини зі зміненою кристалічною решіткою і високою швидкістю рекомбінації носіїв заряду. На міжфазній межі електрони і дірки заповнюють гетеропари. У такій тунельно-рекомбінаційній моделі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ складається з двох послідовно з'єднаних контактів метал-напівпровідник і зарядоперенос при цих процесах не залежить від температури. ВАХ такого гетероперехода має вигляд[2]:

$$I = I_0 \left[ \exp(\pm \alpha U) - 1 \right], \quad (1.3)$$

$$I_0 = I_{00} \exp(\beta T), \quad (1.4)$$

де  $I_{00}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ —сталі, які не залежать від  $U$  и  $T$ .

З використанням формул будується графік ВАХ в координатах  $\ln I-U$  (рис. 1.4). При нетеплових струмах лінійні ланки ВАХ будуть паралельні при різних температурах виміру, а при теплових струмах графік зростає при зменшенні температури виміру.

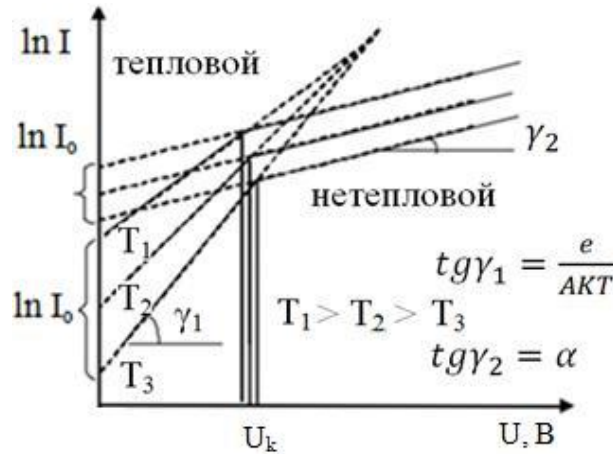


Рис.1.4 Типові експериментальні ВАХ реальних ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ для теплових і нетеплових механізмів струмопереносу[2, 32]

Стан межі розділу матеріалів гетеропереходу характеризує механізм струмопереносу через ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ[2]. Стан межі розділу полікристалічних ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ визначається відстанню між найближчими поверхневими дефектами, які можуть виникати на ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ внаслідок невідповідності параметрів кристалічної решітки монокристалічних матеріалів ( $X_N$ ), і мінімальної концентрації приповерхневих станів ( $N_S$ ). Ці параметри можуть бути розраховані за формулами[10]:

$$X_N = \frac{a_1 a_2}{\sqrt{2}(a_1 - a_2)}, \quad N_S = \frac{4(a_1^2 - a_2^2)}{a_1^2 a_2^2}, \quad (1.5)$$

де  $a_1, a_2$ —константи ґраток контактуючих матеріалів ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ.



Дослідники довели, що при збільшенні кількості дефектів на межі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ погіршуються випрямляючі та інші характеристики напівпровідникових приладів[2,18].

Якщо існує невідповідність параметрів решітки матеріалів ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ менше 1%, тоді зарядоперенос через структуру можна описати моделлю Андерсона. Ця модель не використовується при невідповідності параметрів решітки матеріалів ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ більше 1%. Якщо ж невідповідність періодів ґраток матеріалів ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ більше 7%, тоді ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ можна уявити, як два послідовно з'єднаних бар'єра Шотткі [2,11,18].

Таким чином, розуміння механізму зарядопереносу через ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ дозволяє отримати найоптимальніші робочі властивості для монокристалічних переходів.

## РОЗДІЛ 2

### ВИБІР ПРОГРАМНОГО МЕТОДУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ЦЬОГО ВИБОРУ. ОТРИМАННЯ БАЗОВИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ.

#### 2.1. Розрахунок характеристик фотоперетворювальних фотоелементів

Вольтамперні характеристики (ВАХ) визначаються шляхом побудови діаграм вихідного струму як функції напруги. Сумарний струм, який протікає по контуру в присутності світла знаходиться за формулою:

$$I = I_0 \left[ e^{\frac{qv}{AkT}} - 1 \right] - I_L, \quad (2.1)$$

де  $I_0$ - зворотній струм насичення;

A - діодний фактор якості;

$I_L$ - вироблений фотострум.

Струм короткого замикання  $I_{SC}$  з'являється при короткому замиканні сонячного фотоелемента.

Відповідне рівняння струму можна переписати:

$$I_{SC} = -I_L \quad (2.2)$$

Ми бачимо, що струм короткого замикання дорівнює виробленому фотоструму  $I_L$ . Струм короткого замикання вимірюється в  $\text{mA}/\text{cm}^2$  і знаходиться як густина струму  $J_{SC}$ , за формулою[2, 14,23]:

$$J_{SC} = \frac{I_{SC}}{S}, \quad (2.3)$$

де  $S$  – площа сонячного фотоелемента.

Напруга, при якій струм дорівнює нулю, називається напругою розімкненого ланцюга  $U_{oc}$  або напругою холостого ходу. Напруга розімкненого ланцюга  $U_{oc}$  вимірюється в мВ і визначається за формулою[2, 31]:

$$U_{oc} = A \left[ \frac{kT}{q} \right] \ln \left( \frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right), \quad (2.4)$$

Коефіцієнт заповнення  $FF$  сонячного фотоелемента розраховується за формулою:

$$FF = \frac{U_m I_m}{U_{oc} I_{sc}}, \quad (2.5)$$

де  $U_m I_m$  - гранична вихідна потужність;

$U_{oc} I_{sc}$  – змінна вихідна потужність.

Коефіцієнт корисної дії (ККД)  $\eta$  сонячного фотоелемента визначається як відношення фотогальванічно генерованої вихідної потужності до потужності падаючого світлового потоку [2].

$$\eta = \frac{FF \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.6)$$

Якщо сумарна потужність випромінювання, яке падає на фотоелемент дорівнює 100, тоді коефіцієнт корисної дії визначається за формулою:

$$\eta = U_{oc} I_{sc} FF \quad (2.7)$$

## **2.2. Моделювання характеристик ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ на основі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ: основні підходи та принципи.**

З початку 80-х років ХХ століття комп'ютерне моделювання основних фізичних процесів, які відбуваються в тонкоплівкових ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ, дуже цікавить дослідників. В наш час широко використовується тривимірне числове моделювання для проектування ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ та їх тестування [2].

Програмний пакет, який використовують для моделювання роботи тонкоплівкових ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ, повинен задовольняти наступним вимогам:

- використовуватися для моделювання процесів у багатошарових структурах;
- використовуватися для моделювання процесів у ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ з шарами, ширина  $\lambda$  яких є більшою  $3\epsilon\lambda$ ;
- враховувати рекомбінації генерованих носіїв заряду на глибоких рівнях в об'ємі матеріалу та на поверхні;

- поділ енергетичних зон на складові частини;
- моделювання основних електрофізичних характеристик ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ як функції від часу;
- значна швидкість моделювання фізичних процесів та легкість у використанні.

Пакет моделювання повинен мати не менше 6 шарів ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ, має бути передбачена можливість моделювання не лише темнових і світлових ВАХ, а також інших залежностей (квантовий вихід, частотно-ємнісні залежності тощо) [2].

Порівняльні характеристики основних програмних пакетів, які використовуються для моделювання фізичних процесів у ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ на основі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ, наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

**Порівняльні характеристики програм для моделювання фізичних процесів у ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ [2]**

	AMPS	SCAPS	ASA	PC1D
Макс. кільк. прошарків	30	7	необмежена	5
Побудова зонних Діа-грам	Враховується модель Андерсона			
Розділення Енерго-зон	ні	ні	так	ні
Глибокі стани в Забороненій зоні	50	3	4	без заряду
Глибокі поверхові стани	ні	так	ні	ні
Багато-профільне моделювання	ні	так	так	короткочасно
Числове Набли-ження	враховується			
Швидкодія	мала	висока	дуже висока	дуже висока
Інтер-активність	задовільна	добра	відсутня	добра

«Активна» панель у відмічених програмних продуктах дозволяє встановити вхідні параметри для моделювання: робочу температуру, діапазон напруги, частоту, тип випромінювання тощо. Після введення початкових параметрів використовується «активний перелік розрахункових

залежностей», що дозволяє одержувати ВАХ, частотно-ємнісні характеристики, залежності «квантовий вихід – довжина хвилі (енергія фотона)» та ін [2].

Програмні пакети, наведені у таблиці 2.1. мають свої переваги і недоліки, але найбільш застосованим з них є програмний пакет SCAPS. У програмному пакеті SCAPS основні параметри моделювання можуть бути задані користувачем. Це дозволяє використовувати пакет програм для ефективного вирішення певних задач [2].

В програмному пакеті SCAPS можна зберігати результати моделювання в форматі ASCII і далі обробляти їх в інших програмних пакетах. Завдяки своїм перевагам перед іншими програмними пакетами SCAPS набув широкого використання. Опишемо основні особливості програмного пакету SCAPS-1D [2, 34]:

1. Можливість розділення рівнів Фермі – користувач може редагувати показники для визначення електростатичного потенціалу та положення рівнів Фермі;
2. У випадку відхилень в розрахунках дані виводяться на екран, що дає користувачу можливість спостерігати всі розраховані точки;
3. Освітлення ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ можливо з фронтальної і з тильної сторони;
4. Методом інтерполяції з попередньо розрахованих ВАХ визначають основні параметри ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ;
5. Результати дослідження виводяться в лінійному і в логарифмічному масштабах;
6. Числові дані моделювання зберігаються і можуть оброблятися в інших утилітах [2].

Завдяки своїм можливостям програмний пакет SCAPS широко застосовується для моделювання основних характеристик ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ на основі гетеропереходів [2].

### 2.3. Вибір базових вхідних параметрів моделювання

Щоб розробити числове моделювання робочих характеристик фотоперетворювачів, виконаних на базі напівпровідникових плівок полікристалічного сіліцію необхідно задати вхідні параметри матеріалів, що входять до складу фотоперетворювача (товщина віконного та поглинаючого шару ( $d$ ), ширина ЗЗ матеріалів ( $E_g$ ), їх електронна спорідненість ( $\chi$ ), діелектричні сталі напівпровідників ( $\epsilon/\epsilon_0$ ), рухливості електронів та дірок ( $\mu$ ), тощо) [2].

На основі світлових ВАХ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ в подальшому розраховуються параметри фотоелектрофізичних приладів:

- напруга холостого ходу  $U_{oc}$  ;
- струм короткого замикання  $J_{sc}$ ;
- фактор заповнення  $FF$ ;
- коефіцієнт корисної дії  $\eta$ .

Базові вхідні параметри шарів, що використовувалися для моделювання фізичних процесів у ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ, наведені в табл.2.2.

Таблиця 2.2

**Вхідні параметри моделювання процесів у  
ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ZnO/ Si [2]**

Шар	<i>n</i> -p-Si	<i>p</i> -Si
Товщина $l$ , мкм	0,8	3
Ширина зони $E_g$ , eV	1,3	1,12
Спорідненість електронів $\chi$ , eV		
Діелектрична константа $\epsilon/\epsilon_0$	9	10
Густина станів в зоні провідності $N_C$ , см <sup>-3</sup>	$2,2 \cdot 10^{18}$	$2,2 \cdot 10^{18}$
Густина станів в валентній зоні $N_V$ , см <sup>-3</sup>	$1,8 \cdot 10^{19}$	$1,8 \cdot 10^{19}$
Рухливість електронів $\mu_e$ , см <sup>2</sup> /с	100	$1,45 \cdot 10^3$
Рухливість дірок $\mu_h$ , см <sup>2</sup> /с	25	500



## РОЗДІЛ 3

### РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ. ВИСНОВКИ

#### 3.1. Моделювання фотоперетворювальних елементів на основі n-P-Si /p-Si

##### 3.1.1. Вплив експлуатаційної температури на електричні характеристики плівкової системи

Фотоперетворювальні елементи під час роботи нагріваються, а це може вплинути на їх робочі характеристики. Тому виникла необхідність дослідити вплив температури на вигляд ВАХ гетеропереходу n-P-Si / p-Si [2].

Моделювання проводилося в інтервалі температур  $T = 300\text{-}340$  К.

Результати розрахунків основних характеристик фотоперетворювачів наведені на рис. 3.1 та в таблиці 3.1.

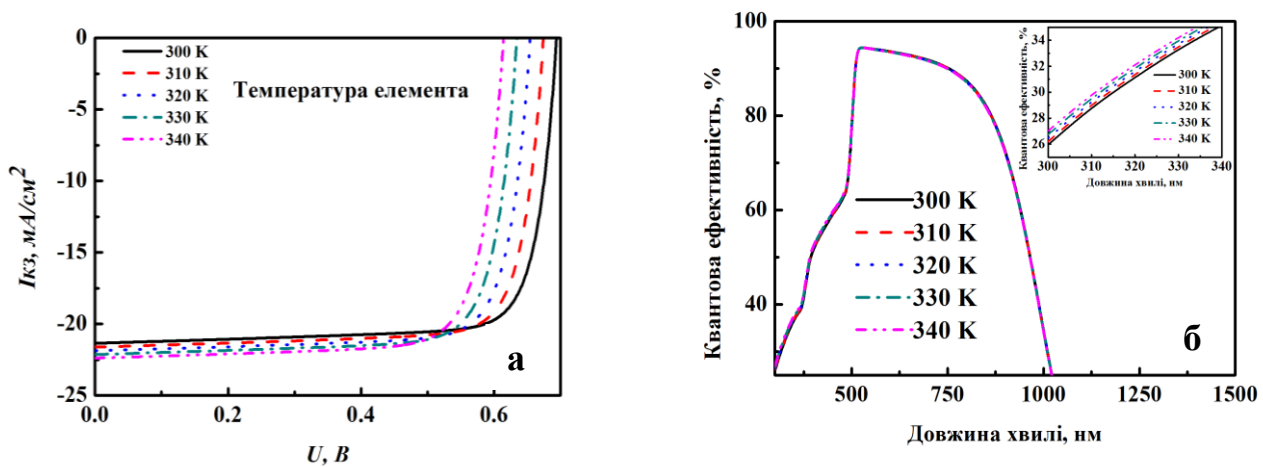


Рис. 3.1. Світлові ВАХ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ на основі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ ZnO/Si (а) та їх спектральні залежності квантового виходу (б) [2].

Таблиця 3.1

**Вплив експлуатаційної температури на електричні характеристики  
ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ на основі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ P-Si/ Si [2]**

Робоча температура $T$ , К	$U_{oc}$ , В	$J_{sc}$ , мА/см <sup>2</sup>	$FF$ , %	$\eta$ , %
300	0,69	21,98	79,77	12,16
310	0,68	23,53	79,49	12,67
320	0,66	25,04	79,18	13,11
330	0,65	26,46	78,85	13,46
340	0,63	27,78	78,43	13,71

Ми бачимо, що при збільшенні температури експлуатації сонячного елемента відбувається збільшення значення струму короткого замикання  $J_{sc}$ , а значення напруги розімкненого ланцюга  $V_{oc}$  зменшується.

Встановлено, що ефективність фотоперетворювачів на основі гетеросистеми P-Si/ Si при підвищенні температури експлуатації збільшувалася від 12,16% (300 К) до 13,71% (340 К) [2].

**3.1.2. Вплив товщини поглинаючого шару p-Si на електричні характеристики ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ**

Кількість поглинутого приладом випромінювання залежить від товщини поглинаючого шару, тому з'явилась необхідність дослідити її вплив на основні електрофізичні характеристики фотоперетворювача [2].

При моделюванні були взяті наступні вхідні параметри: температура навколишнього фотоперетворювачахредовища становила 300 К, товщина віконного шару ZnO приймалася сталою та складала  $d = 0,10$  мкм. Товщина поглинаючого шару змінювалась в межах  $d = (20 - 50)$  мкм.

Світлові ВАХ та спектральні залежності квантового виходу ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ на основі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ P-Si/ Si, розраховані при різній товщині поглинаючого шару, наведені на рис. 3.2.

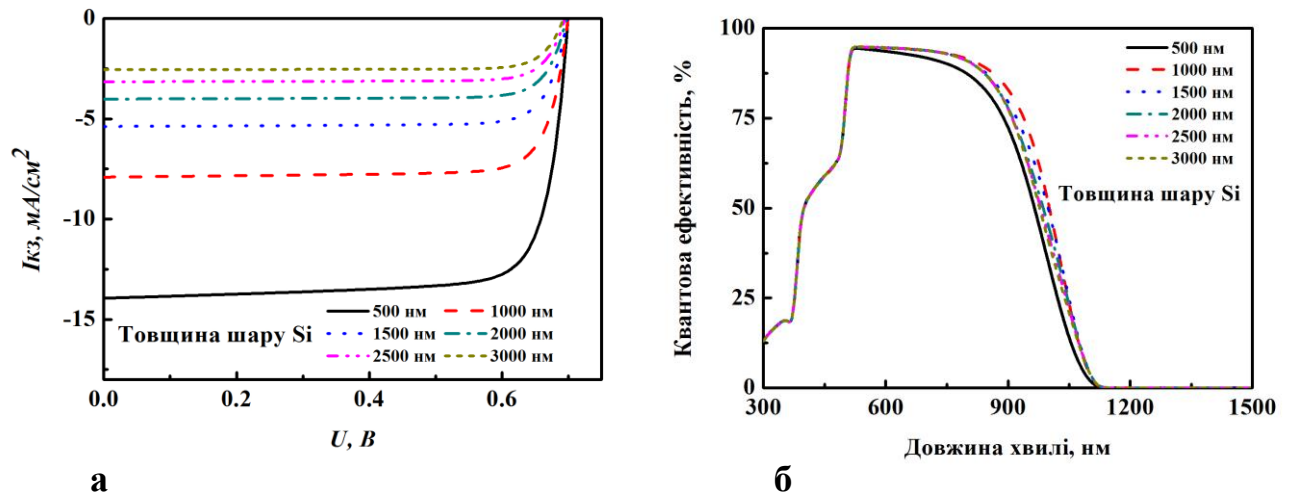


Рис. 3.2. Світлові ВАХ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ на основі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ p-Si/ Si (а) та їх спектральні залежності квантового виходу (б).

Результати моделювання основних характеристик ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ на основі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ P-Si/ Si наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

### Вплив товщини поглинаючого шару p-Si на електричні властивості ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ

#### P-Si/ Si

Товщина шару Si $d$ , мкм	$U_{oc}$ , В	$J_{sc}$ , $\text{mA/cm}^2$	$FF$ , %	$\eta$ , %
20	0,69	21,43	81,35	12,11
25	0,69	13,55	81,49	7,64
30	0,69	9,7	80,82	5,38
35	0,68	7,47	80,05	4,06

40	0,67	6,00	79,47	3,20
50	0,66	4,96	78,92	2,60

З аналізу результатів моделювання видно, що при підвищенні товщини поглинального шару Si спостерігається значне зниження ККД ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ від 12,11% до рівня 2,6 %. При цьому спостерігається зменшення значень  $U_{OC}$  від 0,69 В до 0,66 В, та значне зменшення  $J_{SC}$  від 21,43 до 4,96  $\text{mA}/\text{cm}^2$ . Отже, при збільшенні товщини поглинаючого шару відбувається зниження ККД ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ за рахунок підвищення рекомбінації генерованих носіїв на глибоких центрах, які розташовані на границі розділу струмознімального контакту і поглинаючого шару [2].

З рис. 3.2 б видно, що фотоперетворювальні елементи в області довжин хвиль  $\lambda = 520 - 850$  нм проявляють високу фотоактивність. Квантовий вихід при довжині хвилі меншій 520 нм обумовлений поглинанням випромінювання в віконному шарі p-Si.

В результаті проведених розрахунків встановлено, що найбільш оптимальною товщиною поглинального шару для ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ на основі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ p-Si/Si є значення  $d = 50$  мкм. Саме це значення і було використане нами при подальших розрахунках.

### **3.1.3. Вплив товщини віконного шару p-Si на електрофізичні властивості ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ**

Товщина віконного шару в ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ визначає кількість випромінювання, що надходить до поглинаючого шару фотоперетворювача, тому дуже актуальним є дослідження її впливу на електричні властивості ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ [2].

При моделюванні були взяті наступні вхідні параметри: температура навколишнього фотоперетворювача середовища становила 300 К, товщина

поглинаючого шару приймалася сталою та складала  $d = 50$  мкм. Товщина віконного шару p-Si змінювалась в межах  $d = (10 - 20)$  мкм.

Результати моделювання наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

**Вплив товщини віконних шарів на електричні властивості СЕ на основі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ p-Si/ Si**

Товщина віконного шару $d$ , мкм	$U_{oc}$ , В	$J_{sc}$ , $\text{mA}/\text{cm}^2$	$FF$ , %	$\eta$ , %
10	0,69	21,98	79,77	12,16
12	0,69	21,73	80,29	12,11
15	0,69	21,61	80,72	12,11
18	0,69	21,43	81,35	12,11
20	0,69	21,33	81,66	12,11

На рис. 3.3 наведені світлові ВАХ та спектральні залежності квантового виходу ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ в залежності від товщини конденсати p-Si.

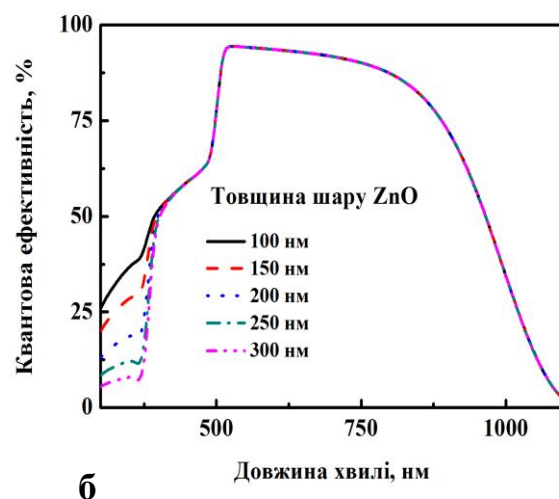
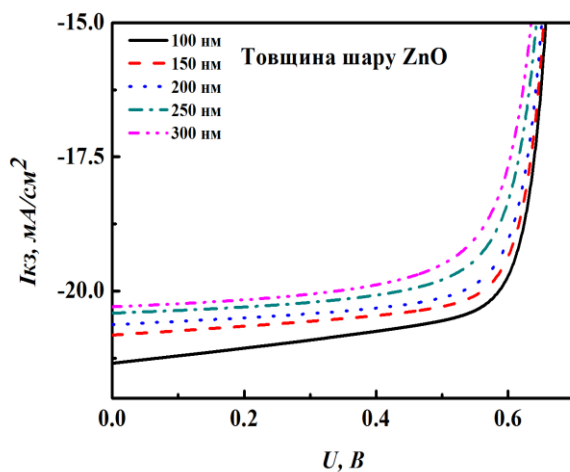


Рис. 3.3. Світлові ВАХ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ на основі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ p-Si/Si (а) та їх спектральні залежності квантового виходу (б) [2].

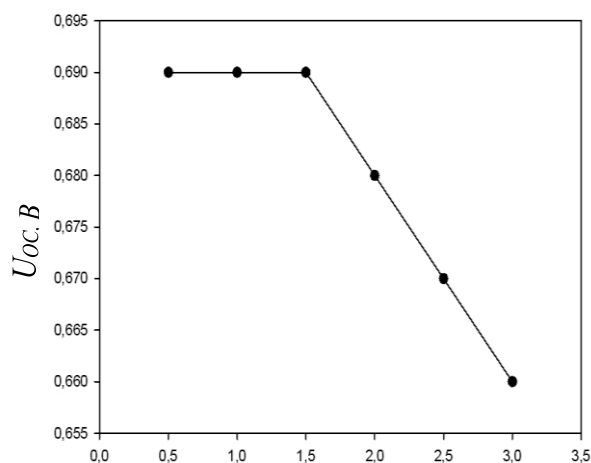
В результаті проведених розрахунків було встановлено, що у випадку використання ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ p-Si/ Si при підвищенні товщини віконного шару від

10 до 20 мкм спостерігається незначне зменшення значення струму короткого замикання  $J_{SC}$  від 21,98 до 21,33  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , а напруга холостого ходу  $U_{OC}$  та ККД залишаються практично незмінними [2].

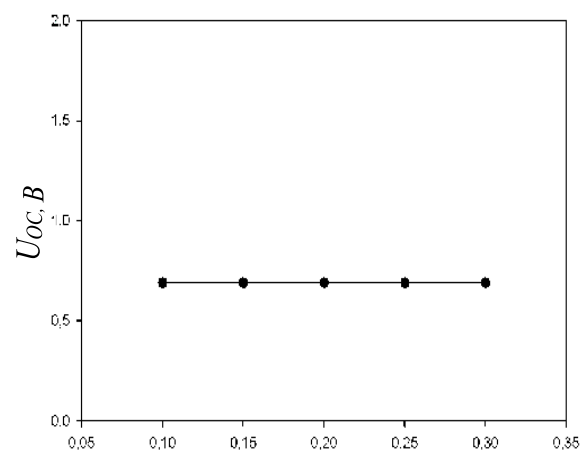
Збільшення товщини віконного шару p-Si призводить до поглинання більшої кількості енергії  $h\nu > E_g$  матеріалу, тому в області довжин хвиль випромінювання  $\lambda < 250$  нм відбувається зменшення значення квантового виходу ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ [2].

Моделювання процесів, що відбуваються у ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ на основі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ p-Si/Si, дозволило визначити оптимальні конструкційні характеристики реальних фотоперетворювачів:  $d_{p-Si}$  повинна складати 20 мкм;  $d_{Si} = 50$  мкм.

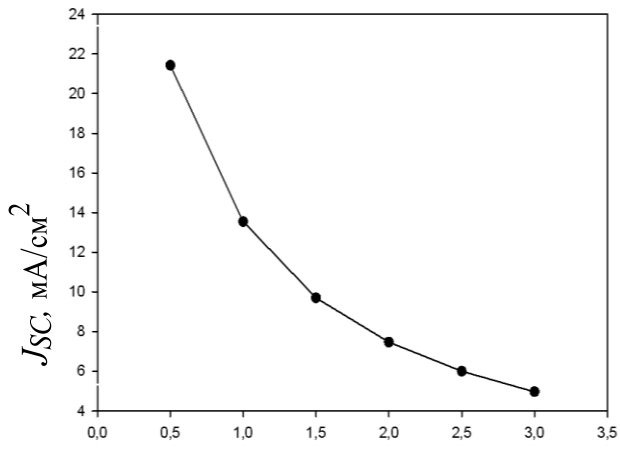
Узагальнені результати визначення впливу експлуатаційних умов та конструкційних особливостей фотоперетворювачів на їх напругу короткого замикання, струми короткого замикання, фактор заповнення ВАХ та ефективність наведені на рис. 3.4.



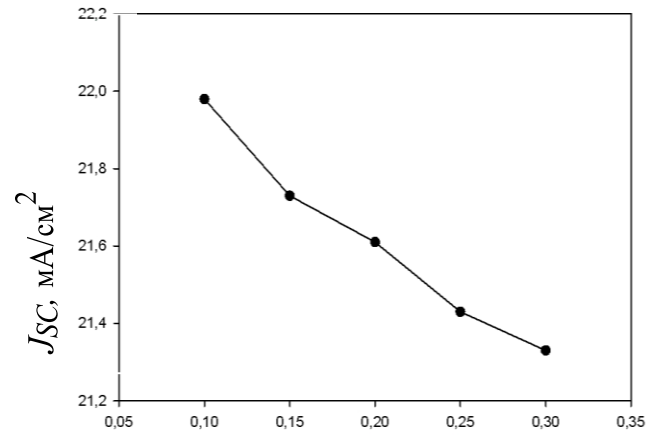
Товщина поглинаючого шару, мкм



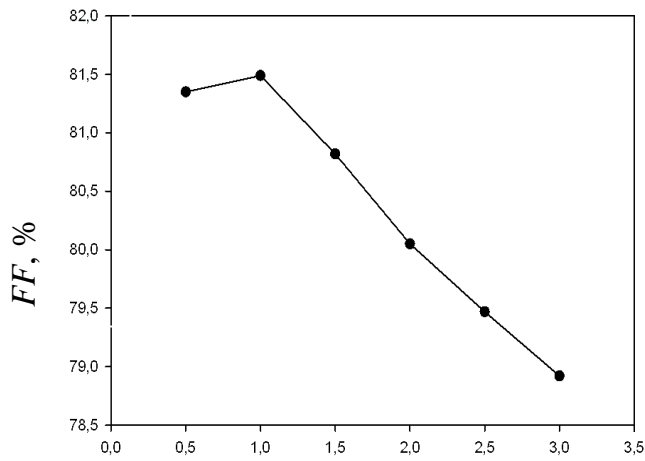
Товщина віконного шару, мкм



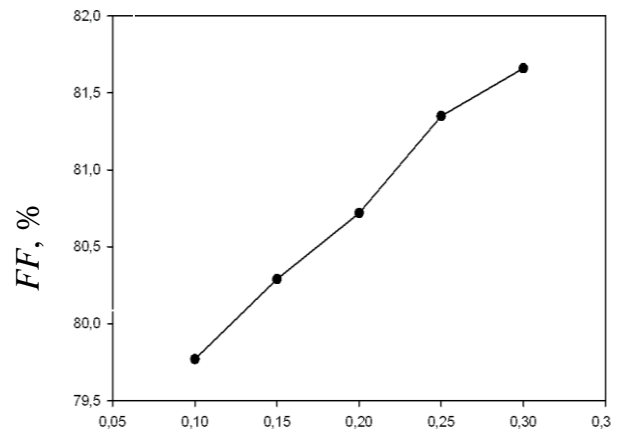
Товщина поглинаючого шару, мкм



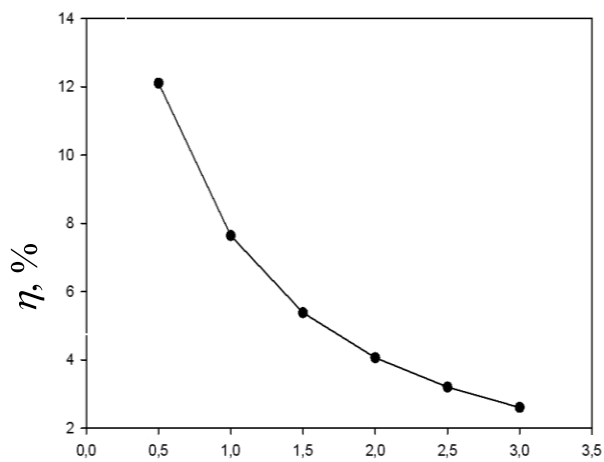
Товщина віконного шару, мкм



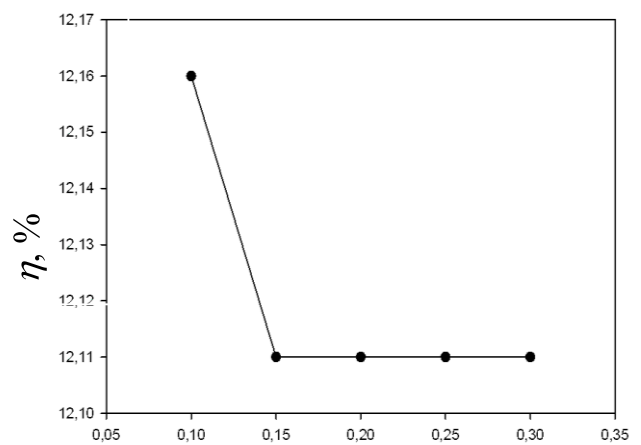
Товщина поглинаючого шару, мкм



Товщина віконного шару, мкм



Товщина поглинаючого шару, мкм



Товщина поглинаючого шару, мкм

Рис. 3.4. Залежність основних характеристик ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ на основі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ P-Si/ Si від їх конструктивних особливостей [2].

### Висновки

При проведенні числового моделювання світлових ВАХ, квантового виходу ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ на основі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ n-p-Si/p-Si були визначені їх експлуатаційні параметри: густина струму короткого замикання, напруга холостого ходу, фактор заповнення ВАХ, ККД залежно від товщини поглинаючого і віконного шарів та температури експлуатації. При проведенні теоретичних розрахунків було встановлено, що максимальна ефективність ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ на основі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ n-p-Si/p-Si з оптимальною конструкцією (товщина поглинального шару  $d_{Si} = 50$  мкм, товщина віконного шару  $d_{p-Si} = 20$  мкм,  $T = 340$  К) може досягати значень  $\eta = 13,71$  % ( $U_{oc} = 0,63$  В,  $J_{sc} = 27,78$  мА/см<sup>2</sup>,  $FF = 78,43$  %). Відповідні фотоперетворювачі мають широку область фотосенсибільності, що лежить в інтервалі  $\lambda = (520 - 850)$  нм. Ефективність ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧАХ на основі ГЕТЕРОПЕРЕХОДИ n-p-Si/p-Si найнижча і не перевищує  $\eta = 2,6$  % при товщині поглинального шару 3 мкм і товщині віконного шару 0,1 мкм, що обумовлено великою кількістю поверхневих станів на гетеромежі внаслідок невідповідності періодів ґраток контактуючих матеріалів.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Poortmans J. Thin film solar cells: Fabrication, characterization and application  
Poortmans, V. Arkhipov. – Leuven, Belgium: John Wiley & Sons, Ltd. IMEC,  
2006. – p. 471.
2. Бойко О.А. Числове моделювання робочих характеристик  
фотоперетворювачів, виконаних на базі напівпровідникових плівок  
оксиду цинку [Текст]: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня  
бакалавра; спец. 171 – Електроніка / О.А. Бойко; наук. керівник М.М.  
Іващенко. – Суми: СумДУ, 2020. – 36 с.
3. II – VI compounds as the top absorbers in tandem solar cell structures  
/ P.Mahawela, G. Sivaraman, S. Jeedigunta [et al.] // Materials Sci. Engin. B. –  
2005. – V.116. – P. 282-291.
4. Георгобиани А.Н. Широкозонные полупроводники  $A_2B_6$  и  
перспективы их применения / А.Н. Георгобиани // УФН.–1974.–Т. 113,  
№1.– С.129-155.
5. Kasap S. The springer handbook of electronic and photonic materials / S.Kasap,  
Capper. – Berlin: Springer, 2007. – p.1406 .

6. Owens A. Compound semiconductor radiation detectors / A. Owens, A. Peacock // Nucl. Instrum. Methods. – 2004. – V. 531. – P. 18-37.
7. Гринев Б.В. Сцинтиляционные детекторы и системы контроля радиации на их основе / Б.В. Гринев, В.Д. Рыжиков, В.П. Фотоперетворювачахминоженко. – Київ: Наукова думка, 2007. – С. 446.
8. Викулин И.М. Инжекционные фотоприемники / И.М. Викулин, Ш.Д. Курмашев, В.И. Стафеев // ФТП. – 2008. – Т. 42, В.1. – С. 113-126.
9. Kolodziejski L.A. Wide-bandgap II-VI heterostructures for blue/green optical sources / L.A. Kolodziejski, R.L. Gunshor, A.V. Nurmikko // Annu. Rev. Mater. Sci. – 1995. – V.25. – P. 711-753.
10. Калинин И.П. Эпитаксиальные пленки соединений  $A_2B_6$  / И.П. Калинин, В.Б. Алесковский, А.В. Симашкевич. – Ленинград: Изд-во ЛГУ, 1978. – С.
11. Takahashi K. Wide bandgap semiconductors. Fundamental properties and modern photonic and electronic devices / K. Takahashi, A. Yoshikawa, A. Sandhu. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007. – P. 486 .
12. Физика соединений  $A_2B_6$  / [Под ред. Георгобиани А.Н.]. – Москва: Наука, 1986. – С. 320 .
13. Panchekha P.A. Structure and technology problems of  $A_2B_6$  semiconductor films / P.A. Panchekha // Functional materials. – 2000. – V.7, №2. – P. 1-5.
14. Modeling thin- film PV devices / M. Burgelman, J. Verschaege, S. Degraeve [et al.]. - Progress in Photovoltaic; Research and Application, John Wiley and Sons, 2004. – P.94-99.
15. Афанасьев, В. П. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния / В. П. Афанасьев, Е. И. Теруков, А. А. Шерченков. – 2-е изд. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 168 с.
16. Wagner J.F., Transparent electronics/J.F. Wagner, D.A. Keszler, R.E. Presley.-Springer Science+ Business Media, LLC.- 2008. -217 p.

17. Іващенко М.М. Структурні оптичні та електрофізичні властивості плівок CdSe та ZnSe і гетеропереходів на їх основі/ Іващенко М.М. –Суми, 2014. –37 с.
18. Transport phenomena in high performance nanocrystalline P-Si :Ga films deposited by plasma - enhanced chemical vapor deposition / J.J. Robbins, J. Harvey, J. Leaf [et al.] // Thin solid films. – 2005. – V.473, – P. 35-40 .
19. Sliva L. M. Study of structural, electrical, optical and magnetic properties of P-Si based films produced by magnetron sputtering. - M.Sc. Thesis: University of Puerto Rico / L. M. Sliva. – San-Juan, 2006. – P. 139 .
20. Characteristic of aluminium -doped zinc oxide films prepared by chemical spray pyrolysis / R. Asomoza, H. Malodonado, M. D. Olvera [et al.] // J. Mater. Sci. Mater. Electron. – 2000. – V.11, № 5. – P. 383.
21. Effect of annealing on the electrical and optical properties of electron beam evaporated P-Si thin films / R. Al-Asmara, G. Ferblantier, F. Mailyly [et al.] // Thin Solid Films. – 2005. – V.473, №1. – P. 49-53.
22. Pushparajaht P. Properties of P-Si films deposited onto by spray pyrolysis / P. Pushparajaht, A. Kariem Aroft, S. Radhakrishnat // Phys. D. Appl. Phys.,– 1994.– V.4, №3- P. 1518 -1521.
23. Bugelman M. Modeling polycrystalline semiconductors solar cells/M. Bugelman, P. Nollet, S. Degrave // Thin Solid Films.- 2000.- №3. – P. 89-94.
24. Ultraviolet spontaneous and stimulated emissions from P-Si microcrystallite thin films at room temperature / P. Zu Tang, G. K. L. Wong, M. Kawasaki [et al.] // Solid State. –1997. - V. 103, №1. - P. 459-463.
25. Бобков, А. А. Наноструктурированные материалы на основе оксида цинка для гетероструктурных солнечных элементов / А. А. Бобков и др. // ФТП. – 2015. – Т. 49, № 10. – С. 1402–1406.

26. Hu J. Textured Aluminum-doped zinc oxide thin films from atmospheric pressure chemical vapor deposition / J. Hu, R.G. Gordon // *J Appl. Phys.*- 1992. - V.71, №1. - P. 880.
27. Deposition and electrical properties of N-In co doped p-type P-Si films by ultrasonic spray pyrolysis / J. M. Bian, X. M. Li, X. D. Gao [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* - 2004. – V.84, №4. – P. 541-543.
28. Young D.L. Structural characterization of zinc stannate thin films / D.L. Young, Williamson, T.J. Coutts // *J Appl. Phys.* – 2002. – V.3, №1 - P. 1464-1471.
29. P-type P-Si thin films grown by MOCVD / X. Li, S. E. Asher, B. M. Keyes[etal.] // *Materials of the 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference* and Song D. Optimisation of P-Si : Al films by change of sputter gas pressure for solar cell application / D. Song, A.G. Aberle, I. Xia // *Appl. Surf. Sci.* – 2003. – V.195, №3. – P. 291-296.
30. Shan F. K. Band gap energy of pure and Al-doped P-Si thin films / F.K. Shan, Y.S. Yu // *J Eur. Ceram. Soc.* –2004. –V. 24, №2. - P. 1869-1872.
31. T. Yamamoto, H. Katayama-Yoshida. Solution Using a Codoping Method to Unipolarity for the Fabrication of p-Type P-Si // *Jpn. J. Appl. Phys.* L166 – 1999 – P. 38.
32. Опанасюк А.С. Структурні, електрофізичні та оптичні властивості плівок  $A_2B_6$  і гетеропереходів на їх основі. Дис. ... докт. фіз.-мат. наук: 01.04.01.-Суми, Сумський державний університет, 2011.- С. 378.
33. Фотоперетворювачахрдюк В.В. Фотоэлектрические процессы в полупроводниках /В.В.Фотоперетворювачахрдюк, Г.Г. Чемересюк, М. Терек. – Одесса: Вища школа. Главное издательство, 1982.
34. Bugelman M. SCAPS user manual / M. Bugelman.- ELIS-University of Gent, 2007.- P.33-39.